

I-631

n 次のせん断振動まで考慮した擬似2次元地盤モデル

熊谷組技術研究所 正員 鈴木猛康

1. まえがき

トンネルの地震応答解析において地盤モデルとしてよく使われるバネ-質量系モデル<sup>1)</sup>（以後Q2Dモデルと称する）は、土柱の基本せん断振動に基づいて、2次元地盤を擬似的に1次元解析モデルに置き換えたものである。このモデルでは、基本せん断振動が卓越する表層地盤に対して適用できる他、地表面近くの変位応答の解析では大いに威力を発揮する。このモデルを拡張し（EXQ2Dモデル）、基本せん断振動からn次のせん断振動まで取り扱えるようにすれば、このモデルの適用可能地盤の範囲が拡大し、さらに地盤の加速度応答の推定にも適用することができるはずである。ここでは、このような拡張モデルの定式化を簡単に説明し、本モデルによる地震応答解析例を示すとともに、2次元FEMによる解析結果との比較を行い、モデルを検証したので報告する。

2. 拡張擬似2次元地盤モデル（EXQ2D）の概要

図-1を用いてモデルの概要を説明する。2次元表層地盤をSoil Segmentに分割し、それぞれのSoil Segmentを多質点系モデルに置き換えると、その自由度Nに応じてN次のせん断振動モードを有することになる。したがって、分割されたすべてのSoil SegmentがN自由度を有しているなら、基本せん断振動に基づいて形成された従来の擬似2次元地盤モデル（Q2D）と同様なバネ-質量系モデルをN組構成することが可能となり、個々のモデルの地震応答解析を実施した後、それぞれの応答を変位関数 $F_{i,n}(z)$ を考慮して足し合わせることで、各地点、深さにおける地盤の地震応答を求めることができる。

すなわち、n次のせん断振動系に関する運動方程式を（1）式とし、このn次せん断振動系の質点iの応答加速度を $\ddot{X}_{i,n}$ 、応答速度を $\dot{X}_{i,n}$ 、応答変位を $X_{i,n}$ とすると、全体系（基本～N次）ではN組のこのような応答値の総和として、深さz、時刻tにおけるSoil Segment iの絶対加速度 $\ddot{x}_{i,n}$ 、相対速度 $\dot{x}_{i,n}$ 、相対変位 $x_{i,n}$ は（2）式のように求めることができる。

$$[M]^{(n)} \{\ddot{X}\}^{(n)} + [C]^{(n)} \{\dot{X}\}^{(n)} + [K]^{(n)} \{X\}^{(n)} = -[M]^{(n)} \{\ddot{e}\} \quad (1)$$

$$\ddot{x}_i(z, t) = \sum_{n=1}^N \ddot{X}_{i,n}(t) F_{i,n}(z) + \ddot{e}_i(t), \dot{x}_i(z, t) = \sum_{n=1}^N \dot{X}_{i,n}(t) F_{i,n}(z), x_i(z, t) = \sum_{n=1}^N X_{i,n}(t) F_{i,n}(z) \cdots (2)$$

3. 地震応答解析およびFEMとの比較

本モデルの有効性を示し、また妥当性を検証することを目的として、図-2に示す2次元地盤の地震応答解析を、本手法および2次元FEMによって実施した。解析に用いた地盤は、図の右に示すような土質構成の整層構造となっており、このような土質構成の半無限地盤では、有効質量比が基本せん断振動モードで0.47、2次モードで0.18、3次モードで0.20であり、2次および3次せん断振動を無視することができない。EXQ2Dでは21節点、19質点に分割し、FEMではEXQ2Dの質点の位置とFEMメッシュの縦の分割が一致するように分割を行って、両モデルによる解析の整合性を図った。さらに両モデルの減衰の与え方や数値積分法についても同一としている。入力は十勝沖地震・八戸港NS成分を、最大加速度を150galに調

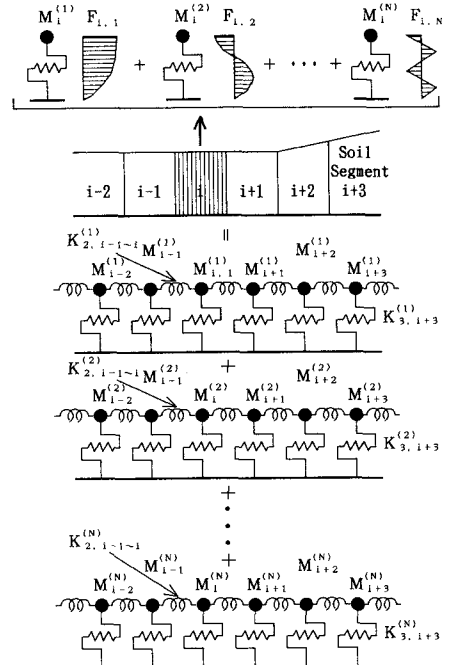


図-1 EXQ2Dモデルの概念図

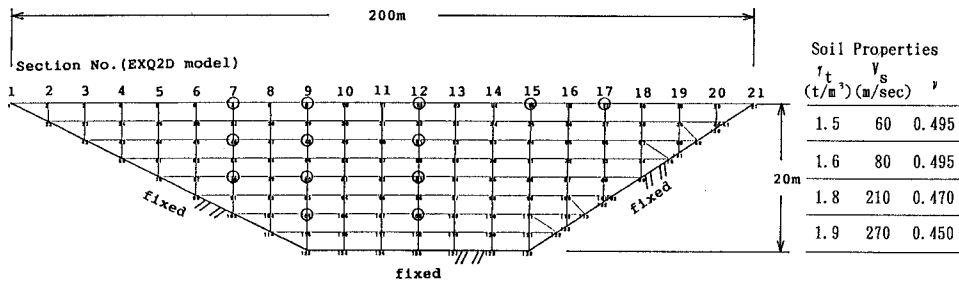


図-2 地震応答解析に用いた地盤およびそのEXQ2Dモデル、FEMによる分割

整して用いた。EXQ2Dによる解析は、基本せん断振動のみ取り扱うケース（1）、基本+2次せん断振動を取り扱うケース（2）および基本せん断振動から3次せん断振動まで取り扱うケース（3）の3ケースとした。これらの解析ケースおよびFEMによる解析との比較は、図-1中の○で示した位置で行った。

表-1に加速度、変位の最大値について行った各解析ケースの解析結果をまとめた。加速度の最大値について比較すると、加速度応答はとくに浅い位置においてEXQ2Dによる解析ケースの（1）と（3）で大きな差が認められる。またEXQ2Dの（3）はFEMによる解析結果とほぼ一致している。つぎに変位について考察してみる。EXQ2Dの解析ケース（1）と（3）の変位の最大値の相違は、深い位置で著しいことが認められる。またEXQ2Dの（3）

表-1 最大加速度、最大変位の比較表

| Location<br>Section<br>No. | Depth<br>(m) | Max. Acceleration (gal) |     |     |     | Max. Displacement (cm) |      |      |      |
|----------------------------|--------------|-------------------------|-----|-----|-----|------------------------|------|------|------|
|                            |              | EXQ2D                   |     |     | FEM | EXQ2D                  |      |      | FEM  |
|                            |              | (1)                     | (2) | (3) |     | (1)                    | (2)  | (3)  |      |
| 7                          | 0.0          | 211                     | 233 | 222 | 255 | 1.48                   | 1.43 | 1.44 | 1.45 |
| 7                          | -5.0         | 132                     | 195 | 194 | 164 | 0.86                   | 0.97 | 1.01 | 0.83 |
| 7                          | -10.0        | 148                     | 156 | 158 | 164 | 0.11                   | 0.14 | 0.15 | 0.16 |
| 9                          | 0.0          | 198                     | 276 | 264 | 269 | 1.87                   | 1.77 | 1.80 | 1.68 |
| 9                          | -5.0         | 155                     | 250 | 259 | 242 | 1.13                   | 1.32 | 1.29 | 1.10 |
| 9                          | -10.0        | 149                     | 185 | 197 | 194 | 0.22                   | 0.33 | 0.37 | 0.31 |
| 9                          | -15.0        | 149                     | 156 | 171 | 171 | 0.08                   | 0.13 | 0.16 | 0.13 |
| 12                         | 0.0          | 231                     | 307 | 307 | 297 | 2.03                   | 1.94 | 1.97 | 1.82 |
| 12                         | -5.0         | 170                     | 268 | 276 | 288 | 1.23                   | 1.41 | 1.38 | 1.31 |
| 12                         | -10.0        | 146                     | 188 | 197 | 214 | 0.24                   | 0.35 | 0.39 | 0.40 |
| 12                         | -15.0        | 148                     | 154 | 170 | 182 | 0.09                   | 0.14 | 0.16 | 0.18 |
| 15                         | 0.0          | 191                     | 283 | 268 | 284 | 1.83                   | 1.73 | 1.75 | 1.62 |
| 17                         | 0.0          | 223                     | 214 | 214 | 216 | 1.37                   | 1.34 | 1.35 | 1.22 |

はFEMによる解析結果とほぼ一致しており、加速度、変位とも、EXQ2Dモデルの妥当性が証明されたと言える。図-3（a）はEXQ2Dのケース（3）とFEM解析による加速度波形の比較例を、図-3（b）は変位応答波形の比較例である。これから明らかなように、EXQ2Dで3次まで考慮すれば、この地盤については十分な地盤震動の評価が可能と判断される。

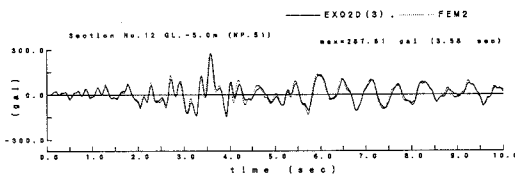


図-3（a） 加速度応答波形の比較例

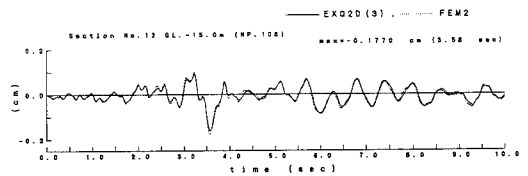


図-3（b） 変位応答波形の比較例

#### 4. まとめ

擬似2次元地盤モデルをn次せん断振動まで考慮できるように拡張した。地震応答解析により、以下のようなモデルの有効性および妥当性が確認された。

- （1）高次のせん断振動を考慮することにより、地表面より浅い位置の加速度応答の解析精度と、深い位置の変位応答の解析精度が向上した。
- （2）ここで示した拡張モデルは、地盤変位応答のみならず加速度応答の解析にも用いることができる。また、2次、3次のせん断振動が卓越するような表層地盤の比較的深い場所のトンネルの地震応答解析に対しても、トンネルに伝達させる地盤変位データの算定方法として有効である。

参考文献 1) 田村ら：Dynamic behavior of a submerged tunnel during earthquakes, 東大生研報告, 1975